УДК 621.313

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДАТЧИКА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ СОВМЕЩЕННОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО БЕСЩЕТОЧНОГО ВОЗБУДИТЕЛЯ

А.Б. Шипицин, А.Н. Мойсейченков

ГОУ ВПО "Уральский государственный технический университет — УПИ". г. Екатеринбург
E-mail: amoise@aport.ru, amoise@002.ru

Предложена математическая модель для расчёта ЭДС измерительной катушки, наведенной зубцовой составляющей результирующего поля в рабочем воздушном зазоре совмещённого многофункционального бесщёточного возбудителя с учетом неравномерности частоты вращения и реакции якоря возбудителя.

Как известно, среднее значение частоты вращения синхронной машины задается числом пар полюсов и частотой питающей сети, имеет постоянное значение и называется синхронной частотой.

Для решения задач диагностирования и задач управления возбуждением синхронной машины может потребоваться знание мгновенного значения частоты вращения, соответствующего мгновенной линейной скорости точки расположенной на диаметре ротора. Величина мгновенной частоты вращения ротора определяется параметрами синхронной машины, отклонением параметров питающей сети и момента нагрузки. Зная значения мгновенной частоты вращения ротора и частоты вращения поля статора, можно определить значение внутреннего угла синхронной машины.

Измерить мгновенное значение частоты вращения синхронной машины можно различными способами. В числе прочих для этой цели применяются измерительные преобразователи, работающие по принципу индукторного генератора. Более удобными в эксплуатации будут способы, не требующие сопряжения и центровки валов измерительного преобразователя и синхронной машины. Один из таких способов – измерение частоты зубцовой составляющей электромагнитного поля в рабочем воздушном зазоре совмещенного многофункционального бесщеточного возбудителя.

Совмещенный многофункциональный бесщеточный возбудитель (СМБВ) разработан на кафедре электрических машин УГТУ-УПИ совместно с ОАО "Уралэлектротяжмаш" (г. Екатеринбург) в 1991 г. [1]. Первый промышленный образец СМБВ был изготовлен в 1993 г. К настоящему времени ОАО "Уралэлектротяжмаш" выпущен отрезок серии совмещённых возбудителей (см. табл.). Выпускаемые возбудители типа СМБВ обеспечивают кратность форсировки по току $K_ф$=2, а по напряже-

Таблица. *Совмещенные многофункциональные бесщеточные возбудители, выпускаемые ОАО "Уралэлектротяжмаш"*

Тип бесщеточного возбудителя	Макс. выпрямленная мощность, кВт	Макс. выпрямленный ток, А	Мин. частота вращения, об/мин	Макс. частота вращения, об/мин	Кратность форсировки, о.е., не менее
ВБ-59/7-10	17	450	1500	1800	2
ВБ-63/9-14	27	450	900	1500	2
ВВБ-81/9-18	53	600	900	1100	2
ВВБ-85/10-10	55	1170	900	1050	2
ВВБ-85/20-10	83	1250	800	1000	2
ВВБ-99/9-22	45	500	275	900	2
ВВБ-99/20-22	60	600	250	900	2
ВВБ-99/30-22	70	650	225	900	2
ВВБ-145/30-30	170	820	200	900	2
ВВБ-220/30-30	200	1000	150	400	2
ВВБ-220/80-30	400	1250	80	300	2

нию – более 3. Типопредставители возбудителей данной серии внедрены на гидрогенераторах мощностью до 11500 кВА, на дизельных автономных электростанциях мощностью до 1250 кВА, газотурбинных энергетических установках мощностью до 1875 кВА и прошли промышленные испытания в составе комплекса генераторного оборудования электростанций, в результате которых подтверждено их соответствие требованиям эксплуатации, а длительная эксплуатация возбудителей совместно с генераторами подтвердила их эксплуатационную надежность.

К достоинствам СМБВ следует отнести полную независимость от внешних цепей, т.е. не требуется дополнительных или резервных источников питания системы возбуждения и регулирования с одновременным уменьшением массы системы возбуждения на 30...50 % по сравнению с бесщеточным возбудительным устройством, состоящим из синхронного возбудителя и подвозбудителя с постоянными магнитами. При вращении ротора СМБВ обеспечивает возбуждение синхронной машины, гашение поля, работу датчика тока якоря СМБВ, а также питание системы управления и АРВ независимо от режима работы энергосистемы и возбуждаемой синхронной машины.

Характерной особенностью возбудительного устройства является нетрадиционное магнитное и электрическое совмещение нескольких электромеханических преобразователей (рис. 1, 2).

В нем совмещены: синхронный возбудитель (СВ) с комбинированным и электромагнитным возбуждением, имеющий 4-фазную сосредоточенную якорную обмотку, одновременно выполняющую роль первичной обмотки асинхронного подвозбудителя (АПВ); индукторный подвозбудитель (ИПВ), использующий в качестве поля возбуждения зубцовую составляющую поля взаимоиндукции СМБВ; АПВ, поле возбуждения которого создается третьей гармоникой МДС якоря СВ; источник питания автоматического регулятора возбуждения (АРВ) и датчик тока ротора. Совмещенная якорная обмотка АПВ и ИПВ размещена в полюсных наконечниках полюсов электромагнитного возбуждения, обмотки источника питания АРВ (ОИП) и датчика тока ротора ОДТ – в полюсах комбинированного возбуждения. Якорная обмотка ЯО возбудителя через вращающийся полупроводниковый преобразователь ВПП подключена к обмотке возбуждения синхронной машины. Совмещенная якорная обмотка ЯОПВ подвозбудителей

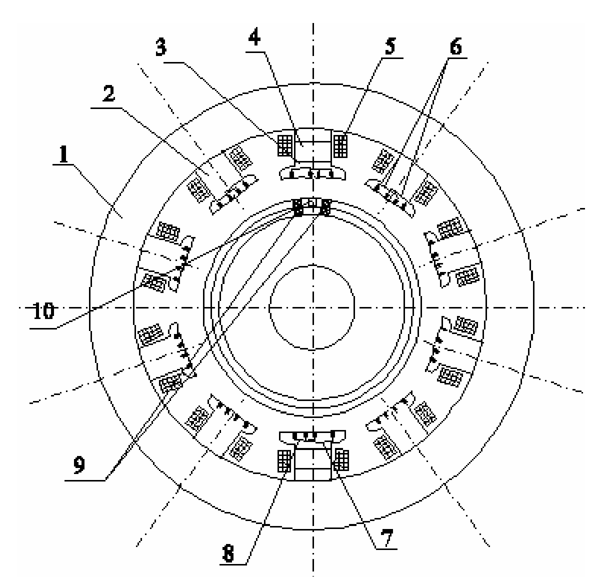


Рис. 1. Конструктивная схема СМБВ: 1) магнитная система индуктора возбудителя; 2) полюс с электромагнитным возбуждением; 3) полюсов с комбинированным (электромагнитным и магнитоэлектрическим) возбуждением; 4) вставки из магнитотвердого материала; 5) обмотка возбуждения возбудителя; 6) катушки четырехфазной совмещённой якорной обмотки подвозбудителей; 7) катушки источника питания АРВ; 8) катушки датчика тока обмотки возбуждения генератора; 9) обмотка якоря возбудителя, уложенная в открытые пазы; 10) фальшпазы

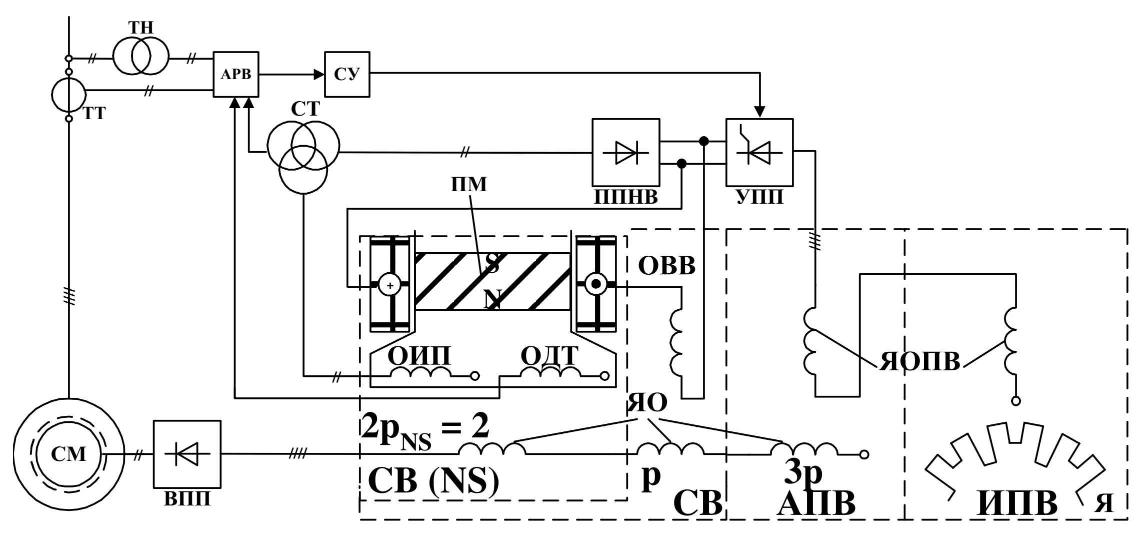


Рис. 2. Принципиальная схема соединения обмоток СМБВ

через статический управляемый преобразователь УПП подключена к обмотке возбуждения возбудителя ОВВ. Нетрадиционное совмещение обусловливает наличие взаимоиндуктивных связей между обмотками совмещаемых машин и дополнительные эффекты, которые определяются принятыми в возбудительном устройстве конструкционными решениями и возникают при совместной работе с преобразователями, что не позволяет использовать традиционные математические модели в полном объеме без изменений.

Для измерения частоты зубцовой составляющей электромагнитного поля в рабочем воздушном зазоре совмещенного многофункционального бесщеточного возбудительного устройства можно использовать катушки, которые расположены на полюсных наконечниках двух противоположных полюсов с комбинированным магнитоэлектрическим возбуждением или двух противоположных полюсов с электромагнитным возбуждением. Измерительные катушки могут быть сдвинуты относительно оси полюса для получения фазового сдвига ЭДС катушек 90 эл. градусов.

Частота ЭДС, индуцированной в катушке, соответствует частоте вращения вала (рис. 3). Возможности современной микропроцессорной техники позволяют измерить частоту индуцированной ЭДС различными методами, каждый из которых имеет свою точность, устойчивость к помехам и режимам работы СМБВ, затраты вычислительных ресурсов.

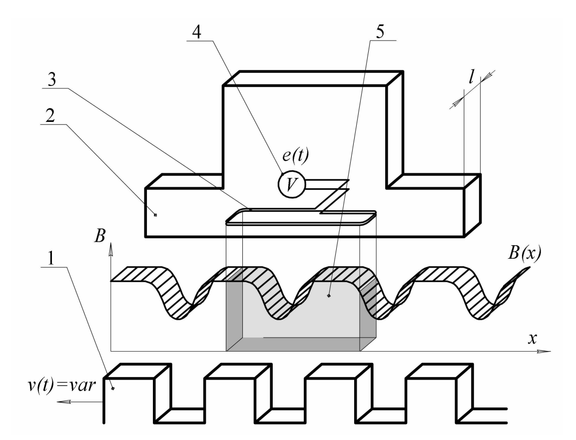


Рис. 3. *К определению частоты вращения ротора: 1) зубчатый якорь возбудителя; 2) полюс возбудителя; 3) измерительная катушка; 4) измерительный прибор; 5) магнитный поток, сцепленный с витками измерительной катушки*

При выборе метода измерения необходимо оценить возможность его применения при изменении размаха и частоты колебаний индуцированной ЭДС в динамических эксплуатационных режимах работы возбудительного устройства. Например, при запуске приводного двигателя или турбины, при качании синхронной машины и др. Интервалы между переходами индуцированной ЭДС через нулевой уровень в ходе переходного процесса при изменении частоты вращения имеют разную длительность.

Для совершенствования методов измерения частоты ЭДС, индуцированной в измерительной катушке, была разработана упрощенная математическая модель. Эта модель имитирует перемещение измерительной катушки с переменной скоростью в магнитном поле рабочего воздушного зазора относительно зубчатого якоря. Распределение магнитного поля в рабочем воздушном зазоре, созданного обмоткой возбуждения и магнитотвердыми вставками, определяется конструкцией и геометрическими размерами СМБВ, влиянием насыщения и реакции якоря. В математической модели влияние зубчатости якоря на распределение поля в зазоре учтено по методу В.П. Шуйского [2] для заданного среднего значения индукции. Зубчатость индуктора учитываем с помощью коэффициента Картера. Поток реакции якоря возбудителя приводит к увеличению индукции под сбегающим краем полюсного наконечника и уменьшению под набегающим краем (рис. 4).

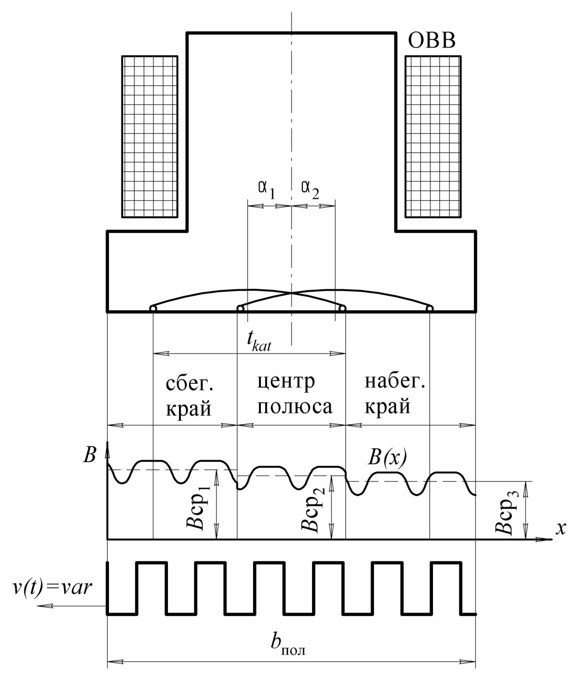


Рис. 4 *К определению ЭДС измерительных катушек, размещенных в пазах полюсного наконечника*

Пазы полюсного наконечника, в которых размещена катушка, выполнены без скоса. Предполагается, что магнитное поле вдоль продольной оси возбудительного устройства распределено равномерно.

Для полученного распределения индукции магнитного поля в рабочем воздушном зазоре под полюсом СМБВ, положения катушки в этом поле и скорости ее относительного перемещения в заданный момент времени находим значение ЭДС, наведенной в проводнике рабочей стороны катушки, как ЭДС, индуцированную в движущемся проводнике. Зная ЭДС в каждом проводнике катушки и число витков, можно определить значение ЭДС всей катушки в заданный момент времени.

Такой подход к расчету ЭДС обусловлен необходимостью минимизировать вычислительные затраты при проверке стабильности работы алгоритма измерения ЭДС измерительной катушки и расчета частоты вращения. Частота ЭДС наведенной зубцовой составляющей поля для некоторых модификаций СМБВ может превысить 1 кГц, а для оценки накапливаемой ошибки измерения может потребоваться расчет работы возбудителя в течение продолжительного времени.

На данном этапе исследований считаем, что пульсации величины рабочего потока из-за наличия зубчатости статора и ротора и широтно-импульсного регулирования тока возбуждения совмещенного возбудителя не создают дополнительной ЭДС в измерительной катушке. В ходе дальнейших исследований планируется учесть влияние этих факторов.

Влияние режима работы СМБВ на распределение магнитного поля в воздушном зазоре учитывается в математической модели для расчета динамических эксплуатационных режимов возбудителя [3]. В этой модели отражены особенности работы возбудительного устройства в различных режимах, обусловленные взаимным влиянием совмещенных электромеханических преобразователей, входящих в композицию, в том числе с учетом насыщения магнитной цепи [4].

Возбудитель рассмотрен как апериодическое звено первого порядка. Учтена положительная обратная связь по току нагрузки возбудителя. Для расчета переходных процессов применен метод последовательных интервалов. Для каждого интервала выполняется расчет магнитной цепи с непосредственным учетом реакции якоря, нелинейности и несимметрии магнитной системы возбудительного устройства на основе представления магнитного ядра машины в виде взаимосвязанных эквивалентных схем замещения, выполненных для минимального числа полюсов комбинированного и электромагнитного возбуждения [4, 5].

По величине среднего значения индукции рабочего воздушного зазора выполняется расчет ЭДС совмещенных подвозбудительных устройств с учетом искажения результирующего поля под влиянием поперечной реакции якоря возбудителя. Определяются электромагнитные параметры совмещенных возбудителя и подвозбудителей. По статическим характеристикам четырехфазных полупроводниковых преобразователей определяются выпрямленные напряжение возбуждения синхронной машины и напряжение возбуждения возбудителя. Приращение тока нагрузки возбудителя (тока возбуждения возбуждаемого синхронного генератора) и тока возбуждения возбудителя находятся из решения дифференциальных уравнений для цепи обмотки возбуждения синхронной машины и для цепи обмотки возбуждения возбудителя соответственно. На следующем интервале для полученных значений тока нагрузки и тока возбуждения возбудителя расчет повторяется [3, 5].

Разработанная математическая модель расчёта ЭДС измерительной катушки, наведенной зубцовой составляющей результирующего поля в рабочем воздушном зазоре СМБВ, предназначена для оценки возможности применения методов измерения мгновенного значения частоты вращения в динамических режимах работы возбудительного устройства и возбуждаемой синхронной машины и является одним из возможных вариантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пластун А.Т. Бесщеточные совмещенные возбудительные устройства синхронных машин (Обобщение теории, разработка и применение): Дис. ... д-ра техн. наук. – Свердловск: УПИ, 1985. – 569 с.
2. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. – Л.: ГЭИ, 1962. – 340 с.
3. Мойсейченков А.Н. Математическая модель совмещенного многофункционального бесщеточного возбудителя для оценки динамических характеристик // Вестник УГТУ-УПИ. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Сборник научных статей. Ч. 1: Общие вопросы электрических машин и трансформаторов. Машинно-вентильные системы. Вопросы диагностики. – Екатеринбург: ГОУ ВПО "УГТУ-УПИ". – 2003. – № 5(25). – С. 130–137.
4. Мойсейченков А.Н. Математическая модель совмещённого многофункционального бесщёточного возбудителя для расчета эксплуатационных режимов работы комплекса "генератор-возбудитель": Дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. – 227 с.
5. Денисенко В.И. Анализ и синтез нетрадиционно совмещенных бесщеточных возбудительных устройств с несимметричными полями возбуждения (развитие теории, расчет и проектирование): Дис. ... д-ра техн. наук. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. – 802 с.